УДК 550.835.510.2+550.835.081.5(571.16)

МЕТОДЫ ФАЗОЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

В.П. Иванченков, О.Н. Вылегжанин, О.В. Орлов, А.И. Кочегуров, А.А. Козлов

Томский политехнический университет
E-mail: onv@am.tpu.ru

Обосновывается применение фазочастотных характеристик отраженных волн в качестве информативных параметров для решения задач прогнозирования геологического разреза. Приводятся результаты исследования эффективности разработанных фазочастотных методов анализа сейсмических волновых полей. Показана высокая разрешающая способность и помехоустойчивость этих методов. Выданный на основе анализа полевых сейсмических материалов прогноз нефтегазоносности подтверждается результатами бурения.

В настоящее время при анализе волновых сейсмических полей широко применяют динамические параметры волн, связанные с амплитудой и энергией отражений. В значительно меньшей степени используются фазовые характеристики (ФЧХ) отраженных волн. Между тем, в фазу сейсмических сигналов, а вернее, в сложный закон изменения их фазовых спектров, заложена важная информация о местоположении отражающих границ, типе скоростного разреза, поглощающих и дисперсионных свойствах слоистых сред [1–5]. На этой основе могут быть синтезированы фазочастотные алгоритмы обработки сейсмических данных, позволяющие в условиях априорной неопределенности относительно формы исследуемых волн обнаруживать и разрешать сигналы на фоне интенсивных помех и получать надежные оценки их параметров. Использование фазочастотных характеристик отраженных волн оказывается также полезным при решении задач прогноза геологического разреза [1–5], в том числе прогнозе нефтегазоносности осадочных толщ. В статье кратко обобщаются резуль-

таты разработки и исследования ряда фазочастотных методов анализа сложных волновых полей и даются отдельные примеры их применения для решения задач прогноза геологического разреза.

Прослеживание сейсмических волн является одной из центральных задач структурной сейсморазведки. Эта процедура имеет важное значение и для решения задач прогноза геологического разреза, в том числе прогноза залежей углеводородов. При решении этих задач не только требуется оценивать время прихода целевых волн, но и осуществлять детальное расчленение слоистых неоднородных осадочных толщ, определять форму выделяемых геологических объектов. В [3] предложен оптимальный метод прослеживания фиксированных волн на фоне гауссовых помех, который реализуется как процедура поиска положения максимума функции вида:

$$G(\tau)=\sum_{k=1}^{n}\gamma(f_k)\cos(\Delta\varphi(f_k)-2\pi f_k\tau). \qquad (1)$$

В выражении (1) весовая функция $\gamma(f_k)$ определяет отношение сигнала к шуму, а $\Delta\varphi(f_k)$ – разность фазовых спектров сигнала и смеси «сигнал плюс шум» на частоте f_k, τ – сдвиг окна анализа, n – число частот, k=1,...,n.

При практическом применении оптимального фазочастотного метода прослеживания (ФЧП) возникают определенные трудности, связанные, в частности, с оценкой величины $\gamma(f_k)$ в выбранном диапазоне частот. Поэтому в [5] были предложены фазочастотные алгоритмы, названные алгоритмами с равновесной и неравновесной обработкой. Эти алгоритмы получены из оптимального метода путем замены в (1) весовой функции $\gamma(f_k)$ на другие, специально подобранные функции. В общем случае, функция качества $L(\tau)$ для таких алгоритмов фазочастотного прослеживания может быть выражена в виде:

$$L(\tau)=\sum_{k=1}^{n}W(f_k)\cos(\varphi(f_k)-2\pi f_k\tau),$$

где $W(f_k)$ – принимаемая весовая функция, $\varphi(f_k)$ – мгновенный фазовый спектр выделяемого участка сейсмотрассы. Временное положение волн оценивается по положению максимума функции $L(\tau)$, которая формируется при перемещении окна анализа τ вдоль сейсмической трассы, рис. 1. Для равновесного алгоритма весовая функция $W(f_k)$ принимается равной единице во всей используемой полосе частот; для алгоритмов с неравновесной обработкой – задается треугольной, синусоидальной или экспоненциальной формы.

Как показали статистические исследования [3, 4], при достаточно широкой полосе анализируемых частот и отношениях сигнала к шуму больше единицы данные алгоритмы незначительно проигрывают в точности оценки местоположения сигнала оптимальному фазочастотному алгоритму, рис. 2.

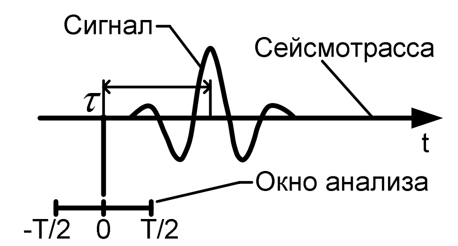


Рис. 1. *Схема фазочастотного прослеживания сейсмических волн; τ – текущее положение центра окна анализа, T – длительность окна анализа, t – время*

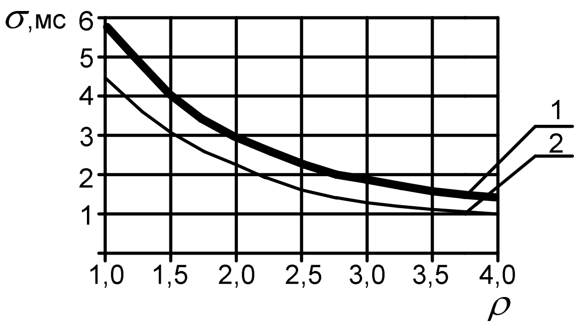


Рис. 2. *Зависимость среднеквадратичного отклонения σ оценки положения сейсмосигнала от отношения сигнала к шуму ρ. Алгоритмы: 1) с равновесной обработкой, 2) оптимальный фазочастотный*

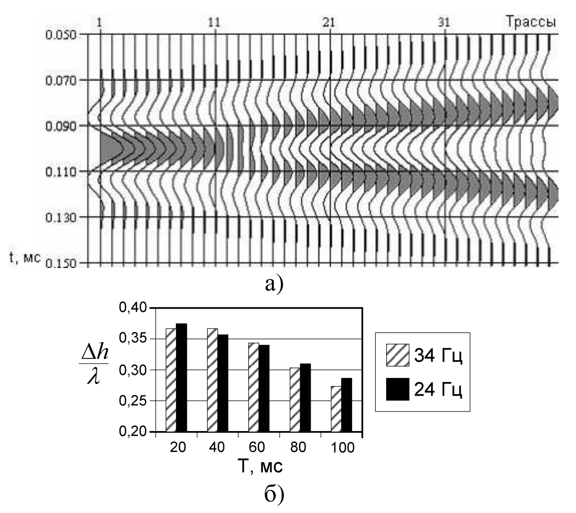


Рис. 3. *Оценка разрешающей способности алгоритма ФЧП с неравновесной обработкой: а) модель сейсмограммы; б) разрешающая способность алгоритма: Δh – оценка разрешения по вертикали; λ – длина волны*

При решении задач детального расчленения тонкослоистых продуктивных толщ особо важное значение приобретает обеспечение повышенного разрешения выделяемых сейсмических сигналов. На рис. 3 в качестве примера показаны результаты исследования разрешающей способности алгоритмов ФЧП с неравновесной обработкой, полученные на модели поля, включающей две одинаковые по форме волны. Как видно из рис. 3, данный алгоритм обеспечивает разрешение по вертикали порядка четверти длины волны. Предложенные алго-

ритмы ФЧП используют для прослеживания фиксированных волн, а также для построения объектно-ориентированных разрезов, которые отличаются повышенной детальностью и разрешением.

При решении задач прогнозирования геологического разреза важным вопросом является изучение взаимосвязи динамических характеристик отраженных волн с петрофизическими параметрами геологических сред. Один из широко распространенных подходов к построению моделей слоистых поглощающих сред связан с представлением среды в виде линейной системы, вносящей определенные изменения в проходящие через нее колебания [1]. В рамках такого подхода было проведено исследование влияния акустической жесткости и поглощающих свойств сред на фазовые спектры отраженных волн [6]. Исследования проводились для моделей поглощающих сред, состоящих из ряда однородных слоев с плоскопараллельными границами при нормальном падении плоских волн. Спектральная характеристика системы, описывающая свойства среды, может быть представлена как:

$$H_{\Sigma}(f) = K_{M-1}(f) + \sum_{i=0}^{M-2} K_i(f) \cdot \prod_{m=i+1}^{M-1} H_m(f) r_{m,m-1}(f) r_{m-1,m}(f),$$

здесь M – количество слоев; $H_m(f)$ – частотная характеристика m-го слоя; $K_i(f)$ – комплексный коэффициент отражения на кровле i-го слоя; $r_{m,m-1}(f)$ – комплексный коэффициент преломления при прохождении волны из m-го слоя в $m-1$-й.

В качестве примера на рис. 4 показаны полученные в результате исследования 4-х моделей поглощающих сред обобщенные фазовые спектры волн, отраженных от подошвы 2-го слоя. Эти модели имитировали наличие слоя песчаника, расположенного во вмещающей толще аргиллитов. В первой модели песчаник предполагался насыщенным газом, во втором – нефтью, в третьей – водой. В четвертой модели имитировалось наличие карбони-

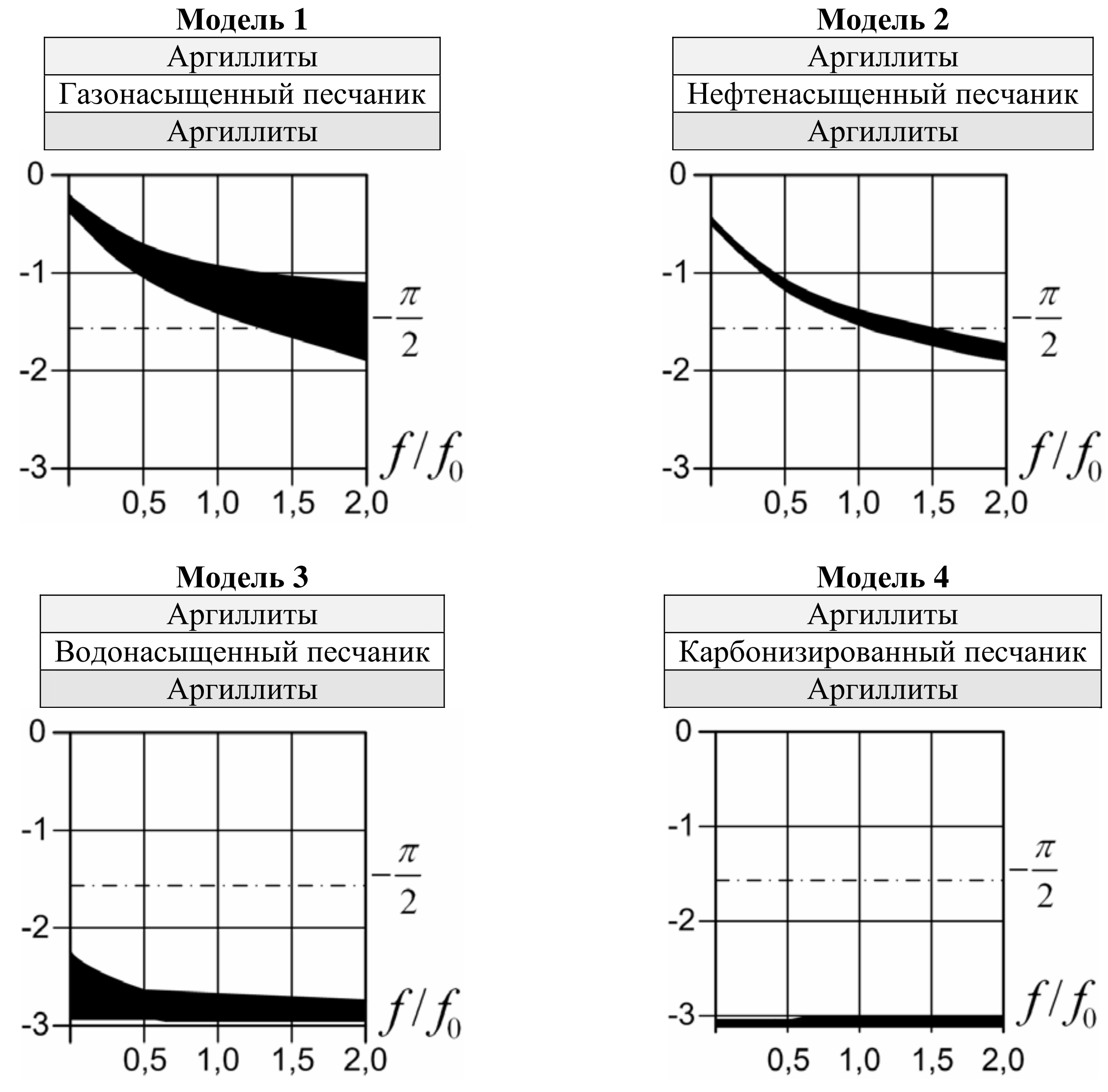


Рис. 4. *Обобщенные фазовые спектры отраженных волн для принятых моделей поглощающих сред: f_0 – базовая; f – текущая частота*

зированного песчаника. Из графиков, представленных на рис. 4, видно, что насыщение породы-коллектора газом или нефтью приводит к резкому изменению фазовых спектров волны, причем в основном диапазоне частот их значения сосредоточены в области, прилегающей к $-\pi/2$. В случае водонасыщенной песчаной толщи фазовые спектры слабо зависят от частоты, и их значения попадают в область –(2,5...3) рад. При отсутствии коллектора (модель 4) значения фазового спектра волны, отраженной от подошвы 2-го слоя, близки $-\pi$ рад.

Проведенные на ряде моделей геологических сред исследования показали, что фазовые спектры отраженных волн значимо зависят от изменения их акустических свойств. Это является важной предпосылкой для использования этих спектров в качестве диагностических признаков при прогнозе геологического разреза осадочных толщ.

На основании данных исследований были разработаны алгоритмы фазовременного (ФАН) и фазоэнергетического (ФЭА) анализов. ФАН-анализ используется при прогнозе типов геологического разреза в около- и межскважинном пространстве [6]. Для каждой анализируемой сейсмотрассы в области исследуемой толщи формируется набор функций качества ФЧП общего вида:

$$L_j(\tau) = \sum_{k=0}^{n-1} W_j(f_k)\cos(\varphi(f_k) - 2\pi f_k \tau), \qquad (2)$$

где j – номер фильтра (j=1,...,l), l – число используемых фильтров. Совокупность функций вида (2) образует ФАН-колонку (ФАН-образ) для данной

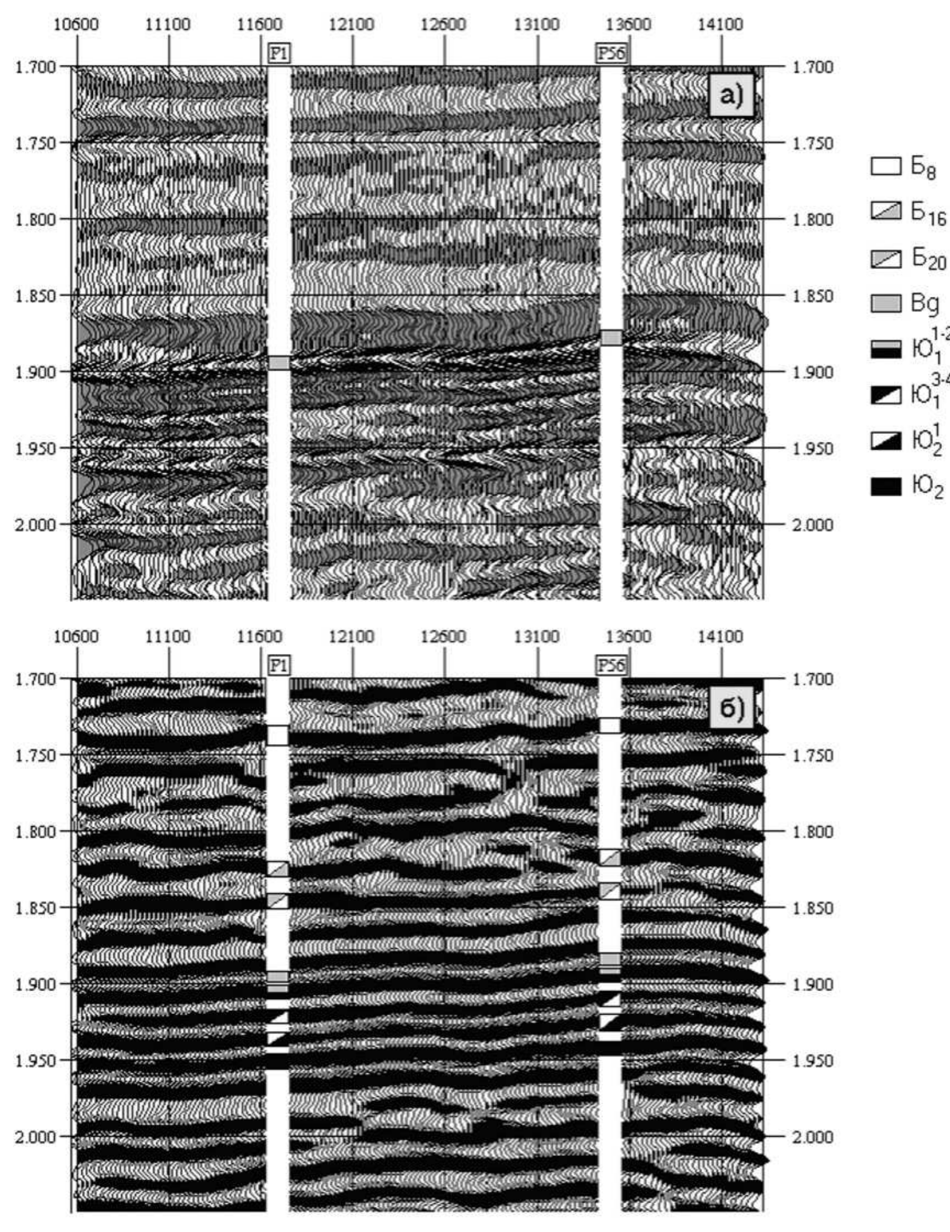


Рис. 5. *Фрагменты временных разрезов: а) ОГТ и б) ФЧП одного из профилей Мыльджинского газоконденсатного месторождения. Отмечены положения меловых ($Б_8$–$Б_{20}$) и верхнеюрских ($Ю_1^{1-2}$–$Ю_2$) пластов, Bg – баженовская свита*

сейсмотрассы, а их совокупность для набора сейсмотрасс вдоль профиля наблюдения образует ФАН-разрез.

Для решения этой задачи привлекают также данные геофизического исследования скважин и имеющиеся материалы по пробуренным ранее на исследуемой площади скважинам. На основе этих данных при проведении ФАН-анализа для пикетов наблюдения, соответствующих положению скважин, получают ФАН-образы, которые далее используют в качестве эталонных при прогнозе типов геологического разреза в около- и межскважинном пространстве. Для проведения прогноза привлекают алгоритмы классификации, в основу которых положена та или иная процедура распознавания образов.

При проведении ФЭА формируют функцию, пропорциональную энергии функций качества (2), получаемых при фазовременном анализе. Аномалии в поглощении и дисперсии скорости сейсмических волн приводят к появлениям аномалий в поведении этой функции, что может служить прогнозным признаком для выделения нефтегазоперспективных зон. По данным ФАН и ФЭА-анализов строят карты распространения типов разрезов и распределения аномальных зон для изучаемой площади. По результатам комплексной интерпретации всех материалов фазочастотной обработки формируют предложение по размещению промысловых и разведочных скважин.

На базе вышеизложенных фазочастотных методов были разработаны программно-алгоритмические комплексы «Геосейф» и «Геосейф-ВСП» [5, 6]. Комплекс «Геосейф» ориентирован на обработку временных разрезов, получаемых при проведении наземных исследований методом общей глубинной точки (ОГТ). Комплекс «Геосейф-ВСП» используется для обработки данных вертикального сейсмического профилирования скважин [6]. На этих программных комплексах проведена обработка большого объема материалов сейсмических исследований ОГТ и вертикального сейсмического профилирования, полученных в условиях Томской и Тюменской областей. На рис. 5–7 приведены отдельные результаты обработки материалов наземной сейсморазведки с помощью разработанных фазочастотных алгоритмов.

Так, на рис. 5 представлены фрагменты разреза ОГТ и полученного из него объектно-ориентированного разреза (разреза ФЧП) для одного из профилей Мыльджинского газоконденсатного месторождения Томской области. Как видно из рисунка, на разрезе ФЧП, в отличие от ОГТ, удается выделить все основные отражающие горизонты нижне-

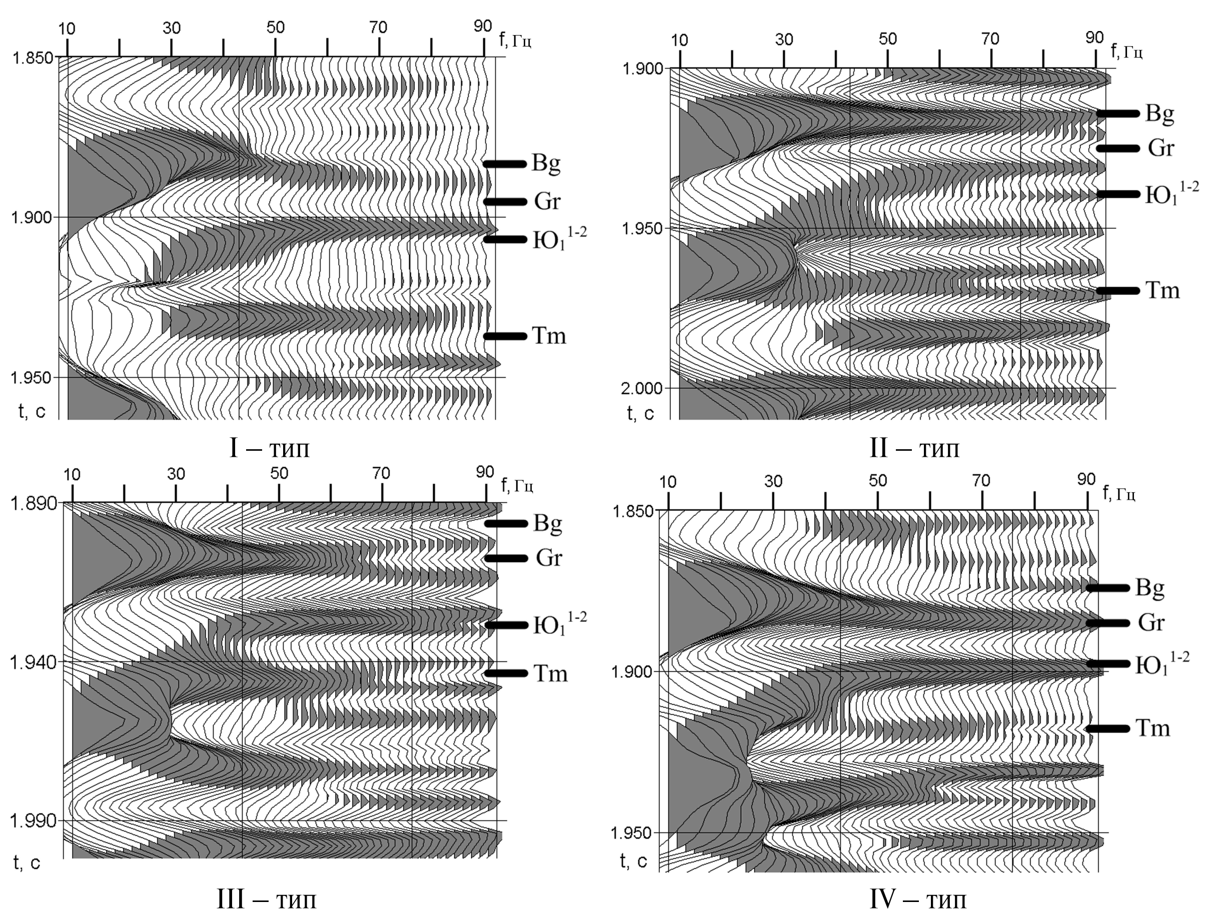


Рис. 6. *Эталонные ФАН-образы, выделенные для различных типов геологического разреза. Gr – георгиевская, Tm – тюменская свиты*

го мела и верхней юры; уверенно прослеживаются даже очень слабые по интенсивности отражения; более отчетливо проявляются различные неоднородности исследуемого геологического разреза.

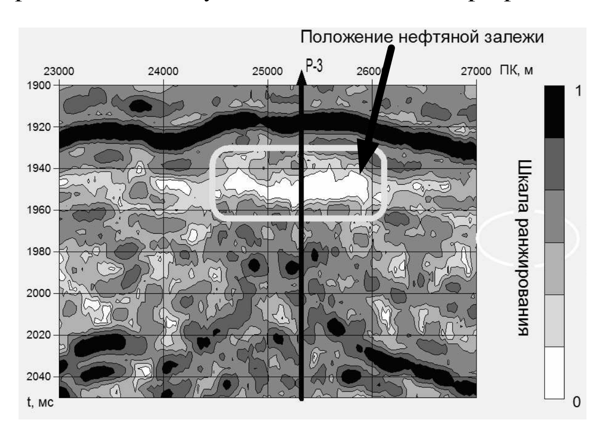


Рис. 7. *Проявление нефтяной залежи на фазоэнергетическом разрезе (Болтная площадь, Томская обл.)*

На рис. 6 представлены эталонные ФАН-образы четырех типов геологического разреза, выделенных по данным ГИС для скважин Болтного нефтяного месторождения. Эти ФАН-образы использовались для определения области распространения выделенных типов разреза на данном месторождении.

На рис. 7 показан фазоэнергетический разрез, построенный по данным ФЭА материалов ОГТ. На разрезе отчетливо проявляется аномалия в области нефтяной залежи, где пробурена разведочная скважина.

Результаты проведенной обработки сейсмических материалов подтверждают большую перспективность применения предложенных фазочастотных методов для решения структурных задач и задач прогноза геологического разреза. Эффективность методов подтверждена бурением разведочных и промысловых скважин. Так, выданный прогноз нефтегазоносности был подтвержден на Соболином, Болтном и Крапивинском нефтяных месторождениях Томского Приобья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авербух А.Г., Трапезникова Н.А. Отражение и преломление плоских волн при нормальном падении на границу поглощающих сред // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1972. – № 9. – С. 74–83.
2. Худзинский Л.А. Об определении некоторых параметров однородных слоев по их фазовым спектральным характеристикам // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1996. – № 5. – С. 68–77.
3. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Определение временного положения сейсмических сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик // Геология и геофизика. – 1988. – № 9. – С. 77–83.
4. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Фазочастотные алгоритмы оценки местоположения пространственно-временных сигналов в условиях априорной неопределенности // Известия вузов. Физика. – 1995. – № 9. – С. 100–104.
5. Иванченков В.П., Вылегжанин О.Н., Орлов О.В. и др. Фазочастотный анализ сейсмических сигналов и его применение в задачах прогноза геологического разреза // Инновационные методы и технологии нефтегазопоисковых работ и возможные пути их реализации в юго-восточных районах Западной Сибири. – Томск: ЦНТИ, 2000. – С. 62–74.
6. Ivanchenkov V.P., Vylegzhanin O.N., Orlov O.V., Kochegurov A.I. Informational technologies of processing and interpretation of data for surface and in wells seismic observations for solving of tasks of geological section prognosis // The 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS-2005, 26th June – 2th July 2005, Novosibirsk State University, Russia. – Novosibirsk, 2005. – P. 159–162.

УДК 620.165.29:620.176.16